

Damir Kukuljan, dipl. ing.
Dr. sc. Dean Bernečić / Ph.D.
Mr. sc. Josip Orović / M.Sc.
Sveučilište u Rijeci / *University of Rijeka*
Pomorski fakultet u Rijeci /
Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2
51000 Rijeka
Hrvatska / *Croatia*

Izvorni znanstveni rad
Original scientific paper

UDK / *UDC*:
629.54:665.72
629.5.03:621.436

Primljeno / *Received*:
2. svibnja 2012. / *2nd May 2012*
Odobreno / *Accepted*:
28. svibnja 2012. / *28th May 2012*

OPRAVDANOST UGRADNJE I PRINCIP RADA UREĐAJA ZA PONOVO UKAPLJIVANJE PRIRODNOG PLINA NA BRODU

THE LNG RELIQUEFACTION PLANT – OPERATING PRINCIPLE AND JUSTIFIABILITY OF ITS INSTALLATION ON BOARD SHIPS

SAŽETAK

Sustav za ukapljivanje se koristi na novijim brodovima za prijevoz prirodnog ukapljenog plina (LNG). Moguće ga je koristiti u kombinaciji s dvotaktnim sporookretnim brodskim motorima, četverotaktnim srednjookretnim brodskim motorima te plinskim turbinama, ali s obzirom na trenutni stupanj iskoristivosti dvotaktni sporookretni brodski motori imaju primat.

U radu je opisan princip rada uređaja za ukapljivanje te uloga glavnih komponenti. Analiziran je proces ukapljivanja te upravljački sustav samog procesa. Napravljena je i komparativna analiza uštede na gorivu u slučaju kada brod izgara samo teško gorivo, samo prirodni plin ili koristi kombinirano izgaranje. Također je napravljena kratka usporedba iskoristivosti današnjih LNG brodova s parnoturbinskim postrojenjem i broda s novom generacijom dvotaktnih sporookretnih brodskih motora koji mogu izgarati plin, a koja se planira koristiti ne samo na LNG brodovima, već i na ostalim brodovima koji zahtijevaju veće pogonske snage. Do sada su ograničavajući čimbenici bili neadekvatna i relativno nesigurna tehnologija ubrizgavanja prirodnog plina u motor, cijene jednog i drugog goriva te cijena samog uređaja za ukapljivanje.

Uređaj za ukapljivanje prirodnog plina u kombinaciji s novom generacijom sporookretnih brodskih dizelskih motora s elektroničkom kontrolom ubrizgavanja zasigurno ima budućnost.

Ključne riječi: uređaj za ukapljivanje, prirodni ukapljeni plin, dvotaktni sporookretni motori, parne turbine

SUMMARY

The reliquefaction plant is used for the reliquefaction of cargo vapor on new LNG carriers. It can be used in combination with two-stroke slow-speed marine diesel engines, medium-speed four-stroke marine diesel engines or gas turbines, but given the current level of efficiency, two-stroke marine diesel engines have primacy.

The paper describes the reliquefaction plant operation principle and the role of the major components. The reliquefaction process has been analyzed as well as the reliquefaction process control system. The fuel savings comparative analysis has been incorporated in a case when the ship burns heavy fuel only, natural gas only and in the case of a combined combustion. A brief efficiency comparison between LNG ships with a steam-turbine plant and the ship with a new generation of two-stroke slow-speed marine diesel plants which can burn bi-fuel (gas and fuel), has been made. Those power plants are planned to be used not only for the LNG carriers than for other ships too, especially when greater propulsion powers are required. The most important limiting factors for the implementation of such technology was an inadequate and relatively unsafe natural gas injection for slow-speed marine diesel engines, the heavy fuel oil prices compared to the LNG price and the reliquefaction plant price.

The reliquefaction plant, in combination with the new generation of slow-speed marine diesel engines with electronically controlled fuel injection, certainly has a future.

Key words: Reliquefaction plant, liquefied natural gas (LNG), two-stroke slow-speed marine diesel engines, steam turbines

1. UVOD

Prirodni plin se u prirodi nalazi u plinovitom stanju te se kao takav i crpi. Kako bi mu se smanjio volumen u svrhu skladištenja i prijevoza potrebno ga je ukapljiti (kondenzirati), odnosno pretvoriti u tekućinu. To se radi hlađenjem, ali problem je što je za ukapljivanje metana potrebna temperatura od $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri atmosferskom tlaku. Kako bi se postigla tako niska temperatura, uređaji za ukapljivanje su prilično složeni, vrlo skupi i troše veliku količinu energije. Zbog te karakteristike te zbog nekadašnje cijene pogonskog goriva i samog LNG-tereta ti su uređaji, za brodsku uporabu, bili neisplativi. Isplativije je bilo napraviti brzi brod s dobro izoliranim tankovima tereta te sav ispareni plin izgarati u generatorima pare. Proizvedena vodena para se koristi kao medij za pogon parnih turbina koje pogone brodski vijak ili generatore za proizvodnju električne energije. Nedostatak je mala iskoristivost takvog postrojenja pa se stalno traže nova rješenja.

Razvojem tehnologije, cijena uređaja za ukapljivanje je pala te u usporedbi s cijenom čitavog broda nije više tako visoka. Također, kretanje cijena fosilnih goriva na tržištu je takvo da nije isplativo koristiti uvijek isto gorivo. Uređaj za ukapljivanje je tehnologija koja se primjenjuje na novijim brodovima za prijevoz prirodnog ukapljenog plina. Služi kako bi se kontrolirao tlak u tankovima tereta, odnosno spriječio ispuštanje, za ozonski omotač vrlo štetnog metana, a koji je glavni sastojak prirodnog plina.

2. OSNOVE POSTROJENJA ZA PONOVO UKAPLJIVANJE ISPARENOG PRIRODNOG PLINA

Postrojenje za ukapljivanje ima dva osnovna kruga: krug isparenog plina i krug rashladnog dušika (Slika 1). Krug isparenog plina sastoji se od pothlađivača isparenog plina, kompresora isparenog plina, izmjenjivača topline, separatora ukapljenog plina i LNG pumpe za povrat ukapljenog plina u tankove (pumpa se koristi u posebnim prilikama kada je tlak u sustavu niži od tlaka u tankovima tereta). Krug rashladnog dušika sastoji se od sušioća dušika, *booster* kompresora dušika, *kompandera*, spremnika dušika i izmjenjivača topline.

1. INTRODUCTION

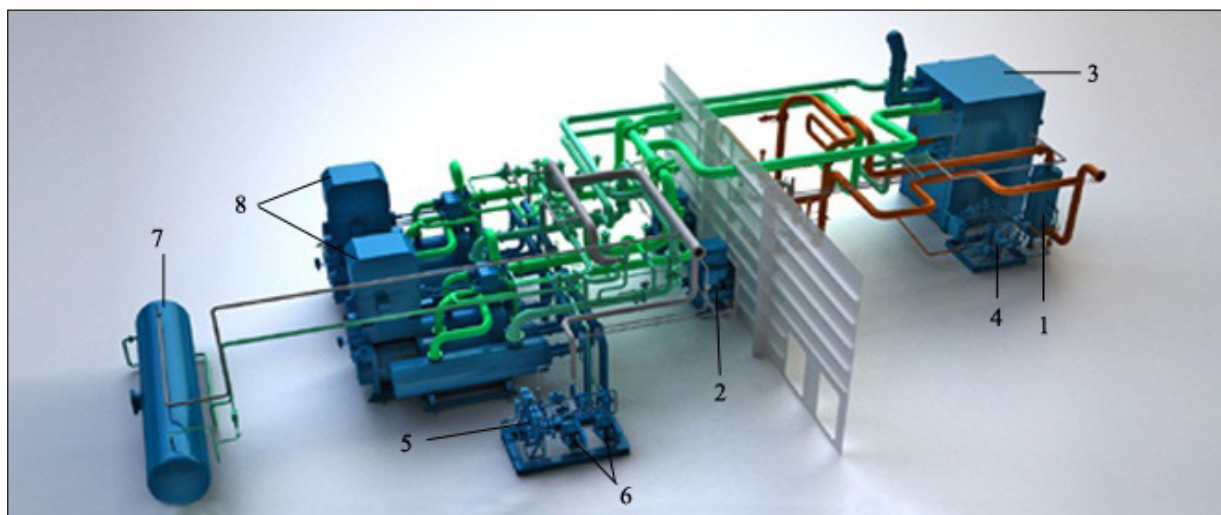
Natural gas is naturally present in the gaseous state and as such it draws. It should be converted to liquid state (condensed) to provide much less volume for transport and storage purposes. This is done by cooling, but the problem is that for methane liquefaction a very low temperature is needed ($-161.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). To achieve such a low temperature the reliquefaction plants are quite complex and very expensive. Those characteristics and the former price of the HFO and the LNG cargo made those devices unprofitable for their use on board ships. It was more profitable to design a fast LNG carrier with well insulated cargo tanks, and then all the vaporized gases to burn in the steam generators. The produced steam is used to drive steam turbines for propelling the ship and for the electricity production. The main disadvantage of this propulsion plants are pure efficiency so the new solutions are constantly looking for.

The technology development has led to the falling of reliquefaction plant prices and compared with the cost of the entire LNG ship it is no longer as great as it was. Moreover, the price movement of fossil fuels on the market is such that it is not always profitable to use the same fuel. The reliquefaction system is a technology which is used on new LNG ships for the transport of liquefied natural gas. Methane is very harmful for ozone and it is the main ingredient of natural gas. The main task of a reliquefaction plant is to control the cargo tanks pressure and to prevent the methane gas discharge into the atmosphere.

2. LNG RELIQUEFACTION PLANT BASICS

The reliquefaction plant has two main circles: the circle of evaporated gas and nitrogen cooling circuit (Fig.1). The evaporated gas circle consists of an evaporated gas cooler, evaporated gas compressors, heat exchangers, a LPG separator and a LNG pump for the return of liquefied gas in the tank (the pump is used in special circumstances when the system pressure is lower than the pressure in the cargo tanks). The nitrogen cooling circle consists of a nitrogen drier, nitrogen booster compressor, compander, nitrogen receiver and heat exchangers.

The primary function of the evaporated gas cooler is to maintain a constant temperature of



Slika 1. Postrojenje za ponovno ukapljivanje isparenog plina [1]
Figure 1 The Natural Gas Vapour Reliquefaction Plant [1]

- (1 – pothlađivač isparenog plina, 2 – kompresor isparenog plina, 3 – izmjenjivač topline, 4 – LNG pumpa, 5 – sušilac dušika, 6 – booster kompresor dušika, 7 – spremnik dušika, 8 – kompander)
 (1 - evaporated gas cooler, 2 - evaporated gas compressor, 3 - heat exchanger, 4 - LNG pump, 5 - nitrogen drier, 6 - nitrogen booster compressor, 7 - nitrogen receiver, 8 - compander)

Osnovna funkcija pothlađivača isparenog plina je održavanje konstantne temperature plina na ulazu u izmjenjivač topline. Pothlađivanjem plina povećava se gustoća plina, čime se povećava maseni protok plina kroz kompresor čime se povećava i njegov stupanj djelovanja. Za pothlađivanje isparenog plina u pothlađivaču služi tekući plin, koji se dovodi iz tankova teretas pumpom za pothlađivanje tereta (spray). Kompresor isparenog plina jedvostupanjski centrifugalni kompresor u kojemu se kapacitet podešava zakretanjem lopatica, s time da se zajednički podešava i prvi i drugi stupanj kompresora. Na taj način se mijenja samo kapacitet dok se tlak na tlačnoj strani kompresora održava konstantnim. Glavna funkcija kompresora isparenog plina je održavanje zadane vrijednosti tlaka u tankovima tereta i povišenje tlaka prije ulaza u izmjenjivač topline. Povišenjem tlaka povisuje se i temperatura kondenzacije, čime raste ukupan stupanj djelovanja cijelog postrojenja. Osnovna funkcija izmjenjivača topline je ponovno ukapljivanje isparenog plina izmjenom topline s hladnim dušikom.

Kompander je trostupanjski radijalni centrifugalni kompresor pogonjen elektromotorom preko zupčastog prijenosa, odnosno reduktora. U sklopu njega, zadnji stupanj je ekspander ili ekspanzijska turbina gdje plin ekspankira i time umanjuje snagu elektromotora potrebnog za pogon cijelog kompandera.

gas entering the heat exchanger. The gas cooling increases gas density, which increases the mass flow of gas through the compressor, increasing the compressor efficiency. For evaporated gas cooling purpose, in the evaporated gas cooler, the liquefied natural gas is used, which is pumped by the cargo tank recirculating and cooling pump (“spray”). The evaporated gas compressor is a centrifugal two-stage compressor type in which the capacity is adjusted by commonly blades rotation of the first and second stage. In this way, the only capacity is changing while the pressure on the compressor discharge side remains constant. The main functions of the evaporated gas compressor are maintaining the default cargo tanks pressure value and increasing the gas pressure before entering the heat exchanger. The increasing pressure increases the temperature of the condensation, thereby increasing the overall efficiency of the entire plant. The main function of the heat exchanger is the evaporated gas reliquefaction by heat exchanging with cold nitrogen. The compander is a three-stage radial compressor driven by an electric motor via gear or gear box. The last, fourth stage of the compander is the expansion turbine (expander) whose purpose is to expand the gas reducing the required power for the complete compander.

2.1. GLAVNE ZNAČAJKE POSTROJENJ ZA UKAPLJIVANJE ISPAREN OG PRIRODNOG PLINA

Sustav za ukapljivanje prirodnog plina treba udovoljavati sljedećim zahtjevima [2]:

- kapacitet sustava mora biti dovoljan da se ukaplji sva količina isparenog plina pri normalnim uvjetima
- sustav za ukapljivanje mora biti opremljen sa 100%-tnom zalihošću koja se zahtijeva IGC Codom
- GCU jedinica mora biti ugrađena kao potpuna alternativa sustavu za ukapljivanje
- dušik koji se nalazi u isparenom prirodnom plinu ne može se ponovo ukapljiti što rezultira smanjenjem njegove koncentracije u prirodnom plinu. Neukapljeni dušik odstranjuje se izgaranjem u komori za izgaranje plina (GCU)
- sustav mora biti opremljen automatskom kontrolom kapaciteta
- mora imati mogućnost zaustavljanja rada sustava za ukapljivanje prilikom rada pumpi tereta, što uklanja potrebu korištenja dodatnog generatora
- kao rashladno sredstvo koristi se dušik, koji zadržava svoju plinovitu fazu tijekom cijelog rashladnog procesa, a on se dobiva pomoću generatora dušika.

2.2. ANALIZA PROCESA UKAPLJIVANJA

Ukapljeni prirodni plin koji se prevozi u tankovima tereta na LNG brodovima isparava uslijed prijenosa topline sa zraka (atmosfera) i mora. Proces ponovnog ukapljivanja isparenog prirodnog plina započinje njegovim odvođenjem iz tankova tereta u pothlađivač (Slika 2). U njemu se ispareni prirodni plin pothlađuje strujom ukapljenog prirodnog plina dovedenog iz separatora ukapljenog plina. Dovedeni ukapljeni prirodni plin pritom isparava i miješa se s dolazećim parama plina iz tankova tereta. Pothlađivač je konstruiran tako da zadrži kondenzat teških komponenata i time spriječi oštećenje kompresora [3].

Pothlađene pare prirodnog plina komprimiraju se u dvostupanjskom centrifugalnom kompresoru na tlak od oko 4,5 bara [3]. Oba stupnja kompresora izvedena su s promjenjivim

2.1. THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE LIQUEFIED NATURAL GAS RELIQUEFACTION PLANT

The ship's LNG reliquefaction plant should meet the following requirements [2]:

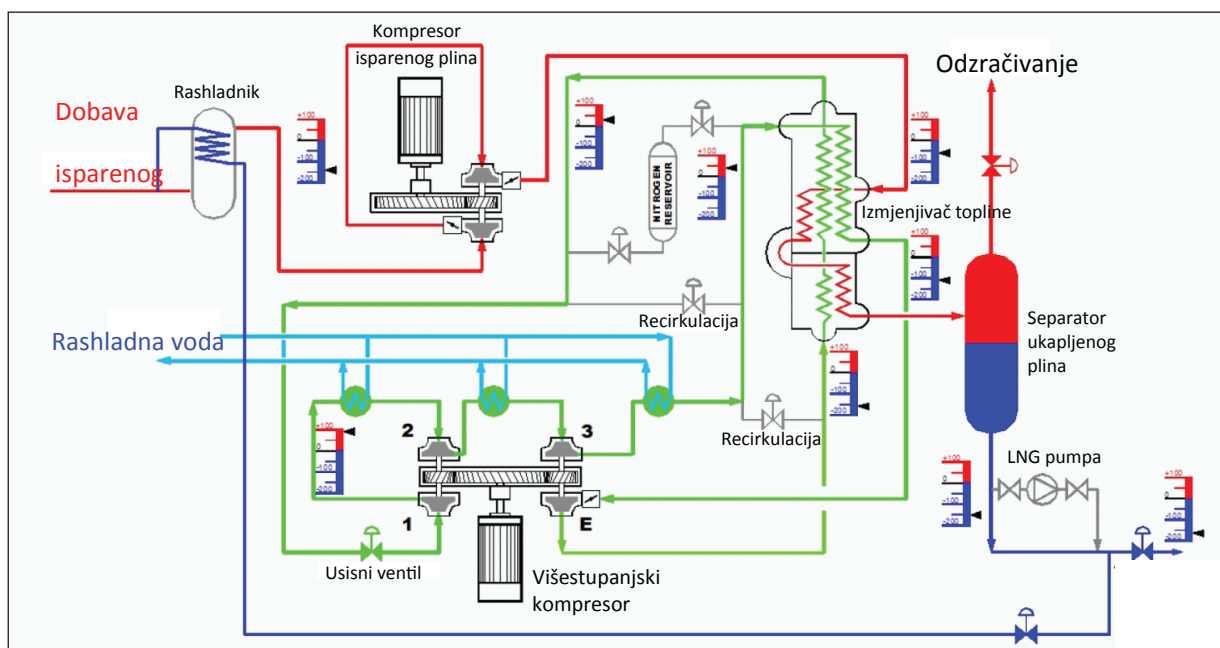
- the reliquefaction plant capacity must be sufficient to liquefy all quantities of the evaporated gas under normal conditions,
- the reliquefaction plant must be equipped with a 100% redundancy which is required by the IGC Code¹,
- the gas combustion unit (GCU) must be installed as a complete alternative for the reliquefaction plant,
- nitrogen contained in the evaporated natural gas cannot be reliquefied, resulting in the reduction of its concentration in natural gas. Non condensed nitrogen is removed by combustion in the gas combustion unit,
- the system must be equipped with automatic capacity control,
- the system must be able to stop the operation of the reliquefaction when the cargo pumps are operating, which eliminates the need to use additional generators,
- nitrogen is used as a refrigerant, which retains its gaseous phase during the whole cooling process, and by using nitrogen generator.

2.2. RELIQUEFACTION PROCESS ANALYSIS

Liquefied natural gas, which is transported in LNG ships cargo tanks, evaporates due to the heat transfer from the air (atmosphere) and the sea. The natural gas reliquefaction process begins with the gas removing from the cargo tanks and pressurizing into cooler (fig. 2). The gas stream is cooled by liquefied natural gas fed from the liquefied gas separator. The liquefied natural gas evaporates and mixes with gas coming from the cargo tanks. The cooler is designed to keep the condensation of heavy components and thereby prevents compressor damage [3].

The refrigerated natural gas vapors are compressed by a two-stage centrifugal compressor at a pressure of about 4.5 bar [3]. Both the compressor stages were designed with the variable

¹ IGC – International Gas Carrier Code



Slika 2. Shematski prikaz postrojenja za ponovno ukapljivanje isparenog plina [4]
Figure 2 LNG Reliquefaction Plant Schematic Diagram [4]

lopaticama za kontrolu i regulaciju protoka isparenog prirodnog plina.

Nakon dvostupanjskog kompresora ispareni plin ulazi u pločasti izmjenjivač topline, gdje se pothlađuje i kondenzira strujom hladnog dušika. Trostrujni izmjenjivač topline također omogućava pothlađivanje struje dušika nakon njegovog trećeg stupnja kompresije.

Ponovno ukapljeni prirodni plin se sakuplja u separatoru, kako bi se odvojili plinovi koji se ne mogu ukapljiti. Neukapljeni plinovi u separatoru sadržavaju veću količinu dušika i najčešće se odvođe u komoru za izgaranje plina (GCU–Gas Combustion Unit).

Kriogeni izmjenjivač topline i separator ukapljenog plina smješteni su u termički izoliranom prostoru (CB – Cold Box), kako bi se smanjio prodor topline. Tlak u separatoru je dovoljan da vrati ukapljeni prirodni plin natrag u tankove tereta i u pothlađivač isparenog plina na početku procesa.

U krugu rashladnog dušika koristi se *Brytonov* rashladni ciklus – slika 3 [2]. Dušik se ne kondenzira ni u jednoj točki procesa.

geometry compressor blades (DVG²) for the evaporated gas flow control and regulation.

After a two-stage compressor, the vaporized gas enters into the plate heat exchanger where it is cooled and condensed by a stream of cold nitrogen. The three-stream heat exchanger also allows nitrogen stream cooling after the third stage of compression.

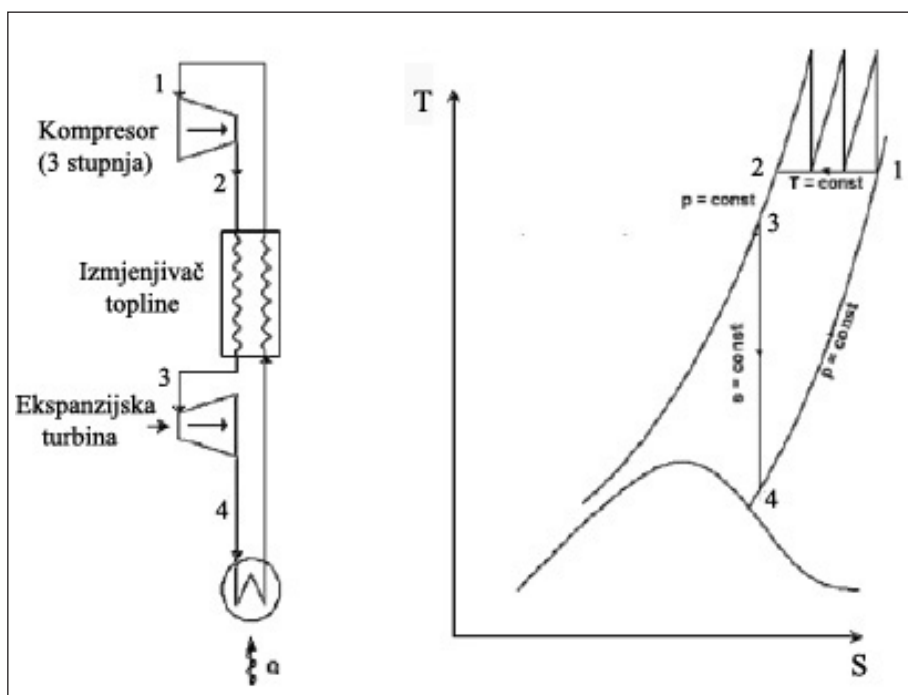
The reliquefied natural gas is collected in the separator where non-condensed gases should be removed. The non-condensed gases in the separator contain a larger amount of nitrogen and are usually vented to the gas combustion unit (GCU).

The cryogenic heat exchanger and liquid gas separator are placed in an insulated cold box (CB) to reduce heat penetration. The pressure in the separator is sufficient to take liquefied natural gas back into the cargo tanks and evaporated gas cooler at the beginning of the process.

In nitrogen cooling circuit the “Bryton’s” cooling cycle is used – fig.3 [2]. Nitrogen does not condense in any point of the process.

Between points 1 and 2 there is an increase of nitrogen pressure during the three stage compression with intercooling. The nitrogen temperature is held constant. In the heat ex-

² DVG – Diffusor Guide Vanes



Slika 3. Brytonov rashladni ciklus [2]

Figure 3 Bryton's Cooling Process [2]

Između točaka 1 i 2 dolazi do povećanja tlaka dušika uslijed trostupanjske kompresije s međuhlađenjem. Temperatura dušika održava se konstantnom. Između točaka 2 i 3 u izmjenjivaču topline dolazi do pada temperature pri konstantnom tlaku. Od točke 3 do 4 dolazi do pada tlaka i temperature rashladnog dušika uslijed ekspanzije u ekspanzijskoj turbini. Porast temperature pri konstantnom tlaku je od točke 4 do 1.

Glavna komponenta u krugu rashladnog dušika je komponder. Dušiku se preko tri stupnja kompresije povećava tlak s 13,5 bara na otprilike 57 bara [3]. Toplina uzrokovana kompresijom odvodi se pomoću hladnjaka slatke vode smještenih između svakog stupnja. Stlačeni se dušik nakon trećeg stupnja kompresije odvodi u izmjenjivač topline, gdje se pothlađuje na temperaturu od -110°C , a zatim ekspanzira u ekspanzijskoj turbini (ekspanderu) na tlak od 13,3 bara i temperaturu od -163°C [3]. Tako ohlađeni dušik odvodi se natrag u izmjenjivač topline, gdje ukapljuje ispareni prirodni plin.

Kapacitet, odnosno rashladni učinak, podešava se promjenom količine protoka dušika u sustavu, mijenjajući pritom tlak i maseni protok rashladnog plina kroz sustav. Kapacitet ovoga sustava za ponovno ukapljivanje prirodnog plina iznosi oko 6 t/h i pri punom opterećenju zahtijeva snagu od 5,8 MW [5].

changer, between points 2 and 3, a temperature drop occurs at a constant pressure. From point 3 to 4 a cooling nitrogen pressure and temperature drop occurs due to the expansion in the expansion turbine. The temperature rise on constant pressure is shown from point 4 to point 1.

The main component in the nitrogen cooling circuit is the compander. Nitrogen pressure is increased from 13.5 bar to approximately 57 bar by the three stages of compression [3]. The heat increase caused by compression is transferred to the cooling fresh water. After the third stage of compression, the compressed nitrogen is led to the heat exchanger, where it is cooled to a temperature of -110°C , and then it expands in the expansion turbine to a pressure of 13.3 bar and a temperature of -163°C [3]. The so cooled nitrogen is transferred back to the heat exchanger, where it liquefies the vaporized natural gas.

The cooling capacity or cooling effect is adjusted by changing the amount of the nitrogen flow through the system, thereby changing the refrigerant gas pressure and mass flow through the system. The capacity of this reliquefaction system is about 6 t/h and it requires the energy of 5.8 MW at full load [5].

2.3. UPRAVLJAČKI SUSTAV POSTROJENJA ZA UKAPLJIVANJE

Upravljački sustav postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina predstavlja njegov najsloženiji dio. Funkcija ovoga sustava je upravljanje radom postrojenja s obzirom na stanje isparenog prirodnog plina (temperaturu, protok, sastav plina, tlak u tanku tereta itd.), a sve u svrhu kako bi postrojenje ispravno funkcioniralo bez nadzora (automatski) za vrijeme plovidbe. Zbog toga sve operacije u postrojenju za ukapljivanje prirodnog plina moraju biti potpuno automatizirane. Upravljački sustav automatski prebacuje na određeni režim rada, koji odabire na temelju tlaka u tanku tereta.

U normalnim uvjetima, prilikom plovidbe broda s teretom, sustav radi u normalnom režimu ukapljivanja (NRM¹ režim). Pod tim režimom podrazumijeva se rad jednog kompresora isparenog plina i jednog komandera dušika [6].

Za teret koji sadrži veću koncentraciju dušika, upravljački sustav prebacuje na djelomični režim ukapljivanja (PRM² režim). U ovome režimu se pare neukapljenih plinova iz separatora vraćaju u tankove tereta (kada je tlak u tanku tereta nizak) ili odvođe u komoru za izgaranje plina (kod visokih tlakova u tanku tereta).

Ako je pri normalnom režimu ukapljivanja tlak u tanku tereta visok, upravljački sustav automatski prebacuje na režim za preveliku količinu isparenog prirodnog plina (EBM³ režim) prilikom kojeg se upućuje i drugi kompresor isparenog plina. Višak isparenog plina koji prelazi ukupni kapacitet postrojenja za ukapljivanje se odvodi direktno u komoru za izgaranje plina.

Prilikom plovidbe broda u balastu najčešće se koristi režim niskog protoka isparenog plina (LFM⁴ režim). Ovaj se režim uključuje kada je protok plina ispod 2 t/h. Tijekom rada u ovome režimu nije potrebno koristiti kompresor isparenog plina pa se zbog niskog tlaka u separatoru koristi LNG pumpa za prebacivanje ukapljenog prirodnog plina natrag u tankove tereta.

¹ Normal Reliquefaction Mode

² Partial Reliquefaction Mode

³ Excess BOG Mode

⁴ Low Flow Mode

2.3. RELIQUEFACTION PLANT CONTROL SYSTEM

The reliquefaction plant control system is its most complex part. The function of this control system is to manage the plant operation with respect to the evaporated gas state (temperature, flow, gas composition, pressure in the cargo tank, etc.), all in order to provide a proper unattended operation (automatically) during the voyage. Therefore, all operations at the LNG reliquefaction plant must be completely automated. The control system automatically switches to the selected mode according to the pressure in the cargo tank.

Under normal conditions, with full cargo, the system works in a normal reliquefaction mode (NRM). Under this regime, only one compressor and one nitrogen compressor are in operation [6].

For cargo that contains a higher nitrogen concentration, the control system switches to a regime of a partial reliquefaction mode (PRM). In this mode, the vapour of non condensed gases from the separator are returned back to the cargo tanks (when the pressure in the cargo tank is low) or taken into the gas combustion unit (at high pressure in the cargo tank).

If the cargo tank pressure is high in the normal mode of reliquefaction, the control system automatically switches to an excess BOG mode (EBOG) in which the second heavy duty compressor starts. The excess of the evaporated gas, which exceeds the total capacity of the reliquefaction plant, is discharged directly into the gas combustion unit.

During the ballast voyage, the LFM is commonly used. This regime switches on when the gas flow is below 2t/h. While working in this mode, it is not necessary to use the evaporated gas compressor and because of the low pressure in the separator the LNG pump is used for transferring liquefied natural gas back into the cargo tanks.

3. ANALIZA ISKORISTIVOSTI I ANALIZA TROŠKOVA POGONSKOG GORIVA

Ako brod nema uređaj za ukapljivanje, iz punih tankova dnevno isparava približno 0,1 do 0,2 % ukupne količine tereta [6], [7], što se izgori u generatorima pare uz dodatno izgaranje teškog goriva. Kod putovanja u balastu (prazan brod) isparavanje tereta je nešto manje te se potreba za energijom nadoknađuje izgaranjem nešto veće količine teškog goriva. Kako bi se uvidjela razlika u troškovima pogonskog goriva, napravljena je komparativna analiza cijene potrošenog goriva broda punog tereta u slučaju kada se troši plin i u slučaju kada se troši teško gorivo.

Kao primjer uzet je brod za prijevoz prirodnog ukapljenog plina kapaciteta 150.000 m³ s 28.920 kW snage na pogonskoj osovini i 1500 kW potrebnih za proizvodnju električne energije, što ukupno iznosi 30.420 kW. Prema [6], ako je dnevno isparavanje 0,12 % od ukupne količine tereta, tada je količina tereta koja se izgara 180 m³/dan. Uz specifičnu težinu LNG tereta od 470 kg/m³ to iznosi 84,6 t/dan ili 3,525 t/h plina. Uz tu količinu plina potrebno je dogorijevati dodatnih 4,99 t/h teškog goriva.

Donja ogrjevna vrijednost prirodnog ukapljenog plina ($H_{d,pl}$) je približno 50 MJ/kg, a teškog goriva ($H_{d,HFO}$) je približno 40,2 MJ/kg.

Pretvorba količine izgorenog goriva u toplinsku energiju:

Toplinska energija dobivena izgaranjem plina:

$$Q_{pl} = \dot{m}_{pl} \cdot H_{d,pl} \text{ [kW]}.$$

Toplinska energija dobivena izgaranjem teškog goriva:

$$Q_{HFO} = \dot{m}_{HFO} \cdot H_{d,HFO} \text{ [kW]}.$$

Toplinska energija kod kombiniranog izgaranja:

$$Q_{uk} = Q_{pl} + Q_{HFO} \text{ [kW]}.$$

Iskoristivost parno-turbinskog postrojenja u primjeru:

$$\eta_p = \frac{P_{st}}{Q_{uk}} = \frac{30,4}{105} \cdot 100 \approx 29 [\%].$$

3. THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS AND FUEL COST ANALYSIS

If the ship does not have a reliquefaction plant, approximately 0.1 to 0.2% of the total amount of cargo evaporates [6], [7] and is burned in steam generators with additional heavy fuels combustion. Cargo evaporation is less in ballast voyage (empty vessel) when the energy need compensates with larger amounts of heavy fuel oil combustion. In order to measure the propulsion fuel cost difference, a cost comparative analysis has been made in case when a ship consumes gas and in case when a ship consumes heavy fuel oil.

As an example, a LNG ship has been taken with a cargo capacity of 150,000 m³, 28,920 kW of propelling power and 1,500 kW electricity production power, which is a total power of 30,420 kW. According to [6], if the daily evaporation is 0.12% off the total cargo load, the amount of cargo that should be burned is 180 m³/day. With the LNG cargo specific gravity of 470 kg/m³ it amounts to 84.6 t/day or 3.525 t/h of gas. With this amount of gas, an additional 4.99 t/h of heavy fuel must be burned.

The lower heating value of liquefied natural gas is approximately 50 MJ/kg, and that of the heavy fuel is approximately 40.2 MJ/kg.

Combusted fuel to thermal energy conversion:

Heat energy given by combusted gas:

$$Q_{pl} = \dot{m}_{pl} \cdot H_{d,pl} \text{ [kW]}.$$

Heat energy given by combusted HFO:

$$Q_{HFO} = \dot{m}_{HFO} \cdot H_{d,HFO} \text{ [kW]}.$$

Heat energy given by combined combustion:

$$Q_{uk} = Q_{pl} + Q_{HFO} \text{ [kW]}.$$

Engine plant efficiency in a.m. example:

$$\eta_p = \frac{P_{st}}{Q_{uk}} = \frac{30,4}{105} \cdot 100 \approx 29 [\%].$$

The current price of heavy fuel oil (c_{HFO}) ISO 380 cSt is approximately 714 US\$/t, while the price of LNG cargo (c_{pl}) to be burned is approximately 767 US\$/t [8]. The price includes LNG cost plus insurance plus freight costs (CIF). The prices are usually in US\$/MBTU

Cijena goriva ovisi o mjestu nabave, a trenutna cijena teškog goriva (c_{HFO}) kvalitete ISO 380 cSt iznosi približno 714 US\$/t, dok cijena LNG tereta (c_{pl}) koji se izgara, iznosi približno 767 US\$/t [8]. Cijena uključuje vrijednost prirodnog plina na ukrcajnom terminalu uvećanu za troškove prijevoza i osiguranja (CIF – Cost + Insurance + Freight). Cijene su izražene u US\$/MBTU, a za pretvaranje u US\$/t uzeta je toplinska vrijednost od 50 MJ/kg.

Cijena plina po satu:

$$C_{pl/h} = \dot{m}_{pl} \cdot c_{pl} [US\$/h]$$

Cijena teškog goriva po satu:

$$C_{HFO/h} = \dot{m}_{HFO} \cdot c_{HFO} [US\$/h]$$

Cijena plina po putovanju:

$$C_{pl} = C_{pl/h} \cdot 24 \cdot d [US\$]$$

Cijena teškog goriva po putovanju:

$$C_{HFO} = C_{HFO/h} \cdot 24 \cdot d [US\$]$$

Ukupna cijena goriva po putovanju:

$$C_{uk} = C_{pl} + C_{HFO} [US\$].$$

Za navedeni primjer LNG broda i njegovu potrošnju može se izračunati razlika u troškovima s obzirom na vrstu i omjer goriva koje se izgara. Za putovanje je odabrana uobičajena ruta Qatar – Japan i udaljenost od 6.700 NM te prosječna brzina broda od 20 čv. Vrijednosti troškova se mogu vidjeti iz tablice 1.

Iz navedenih primjera vidljivo je kako su najmanji troškovi goriva u slučaju kada se izgara samo LNG. Uspoređujući s kombiniranim izgaranjem ušteda je 157.409 US\$ po putovanju, a uspoređujući sa slučajem kada se izgara samo teško gorivo ušteda je 307.514 US\$ po putovanju.

Komparacijom iskoristivost parno-turbinskog postrojenja, koja za uzeti primjer iznosi svega 29%, te postrojenja s novim generacijama dizelskih motora koja mogu izgarati ispareni prirodni plin i čija iskoristivost premašuje 50%, dolazimo do dodatne uštede od preko 20%. Za slučaj kada brod s dizelskim motornim postrojenjem izgara samo prirodni plin to bi bilo dodatnih približno 390.000 US\$ uštede po putovanju, odnosno ukupno približno 700.000 US\$ uštede u odnosu kada bi se izgaralo samo teško gorivo na brodu s

and for the conversion into US\$/t, the lower heating value of 50 MJ/kg has been taken.

LNG gas price per hour:

$$C_{pl/h} = \dot{m}_{pl} \cdot c_{pl} [US\$/h]$$

HFO price per hour:

$$C_{HFO/h} = \dot{m}_{HFO} \cdot c_{HFO} [US\$/h]$$

LNG gas price per voyage:

$$C_{pl} = C_{pl/h} \cdot 24 \cdot d [US\$]$$

HFO price per voyage:

$$C_{HFO} = C_{HFO/h} \cdot 24 \cdot d [US\$]$$

Total fuel price per voyage:

$$C_{uk} = C_{pl} + C_{HFO} [US\$].$$

For the above mentioned ship example and her consumption, the difference in costs, with respect to the type and ratio of fuel to be burned, can be calculated. As the ship's voyage, the usual route from Qatar to Japan, the distance of 6,700 NM, and the average ship speed of 20 knots have been chosen.

The voyage fuel cost analysis can be seen in table 1.

The examples presented in the table show that the lowest fuel costs are in the case when only burning LNG. Comparing the combined combustion, the saving per voyage is US\$ 157,409, while in the case of fuel oil burning only the savings would be US\$ 307,514 per voyage.

Comparing the steam-turbine plants efficiency, which, in the above mentioned example, is 29% only, and a plant with a new generation of diesel engines that can burn vaporized natural gas and whose efficiency exceeds 50%, we get the additional saving of over 20%. In the case when a diesel engine plant ship burns natural gas only, that would be an additional saving of US\$ 390,000 (approx.) per voyage, or a total of US\$ 700,000 (approx.) in savings, as compared to the steam-turbine plant ship burning heavy fuel oil only. The total savings per a 14-day voyage would be US\$ 850,000 as compared to the combined combustion plant, or approximately US\$ 1,000,000, as compared to the plant burning HFO only.

Tablica 1. Primjeri troškova goriva po putovanju**Table 1** Fuel Cost Examples per Voyage

Primjer <i>Example</i>	Fizikalne veličine <i>Physical values</i>	Objašnjenje fizikalnih veličina <i>Physical values explanation</i>	Rezultati <i>Results</i>
Primjer (example) 1: Izgaranje samo plina <i>Gas combustion only</i>	\dot{m}_{pl}	Maseni protok plina <i>Natural gas massflow [t/h]</i>	7,560
	$H_{d,pl}$	Donja ogrjevna vrijednost plina <i>LNG lower caloric value [kJ/kg]</i>	50.000
	Q_{pl}	Energija dobivena izgaranjem plina <i>Energy produced by gas combustion [kW]</i>	105.000
	c_{pl}	Cijena plina <i>LNG CIF price [US\$/t]</i>	767
	$C_{pl/h}$	Cijena plina po satu <i>Burned LNG priceperhour [US\$/h]</i>	5.799
	C_{pl}	Cijena plina po putovanju(14 dana) <i>LNG priceper 14 days voyage[US\$]</i>	1.948.303
Primjer (example) 2: Izgaranje samo teškog goriva <i>HFO combustion only</i>	\dot{m}_{HFO}	Maseni protok teškog goriva <i>HFO mass flow [t/h]</i>	9,403
	$H_{d,HFO}$	Donja ogrjevna vrijednost teškog goriva <i>HFO lower caloric value [kJ/kg]</i>	40.200
	Q_{HFO}	Energija dobivena teškim gorivom <i>Energy produced by HFO combustion [kW]</i>	105.000
	c_{HFO}	Cijena goriva <i>HFO price [US\$/t]</i>	714
	$C_{HFO/h}$	Cijena teškog goriva po satu <i>Burned HFO price per hour [US\$/h]</i>	6.714
	C_{HFO}	Cijena izgorenog teškog goriva po putovanju(14 dana) <i>Burned HFO price per 14 days voyage[US\$]</i>	2.255.817
Primjer (example) 3: Kombinirano izgaranje <i>Combined combustion</i>	\dot{m}_{pl}	Maseni protok plina <i>Natural gas mass flow [t/h]</i>	3,525
	$H_{d,pl}$	Donja ogrjevna vrijednost plina <i>LNG lower caloric value [kJ/kg]</i>	50.000
	Q_{pl}	Energija dobivena izgaranjem plina <i>Energy produced by gas combustion [kW]</i>	48.958
	c_{pl}	Cijena plina <i>LNG CIF price [US\$/t]</i>	767
	$C_{pl/h}$	Cijena plina po satu <i>Burned LNG price per hour [US\$/h]</i>	2.704
	C_{pl}	Cijena plina po putovanju (14 dana) <i>LNG price per 14 days voyage[US\$]</i>	908.544
	\dot{m}_{HFO}	Maseni protok teškog goriva <i>HFO mass flow [t/h]</i>	4,99
	$H_{d,HFO}$	Donja ogrjevna vrijednost teškog goriva <i>HFO lower caloric value [kJ/kg]</i>	40.200
	Q_{HFO}	Energija dobivena teškim gorivom <i>Energy produced by HFO combustion[kW]</i>	55.822
	c_{HFO}	Cijena goriva <i>HFO price [US\$/t]</i>	714
	$C_{HFO/h}$	Cijena teškog goriva po satu <i>Burned HFO price per hour [US\$/h]</i>	3.563
	C_{HFO}	Cijena izgorenog teškog goriva po putovanju(14 dana) <i>Burned HFO price per 14 days voyage [US\$]</i>	1.197.168
	C_{uk}	Ukupni troškovi potrošenog goriva po putovanju(14 dana) <i>Total fuel cost per 14 days voyage [US\$]</i>	2.105.712

parno-turbinskim postrojenjem. Ukupna ušteda bi iznosila 850.000 (uspoređujući s kombiniranim), odnosno približno 1.000.000 US\$ (uspoređujući s izgaranjem samo teškog goriva), za 14 dnevno putovanje.

4. ZAKLJUČAK

Postrojenje za ukapljivanje prirodnog plina na brodu je jedna od važnijih tehnologija koja je omogućila korištenje sporookretnih dizelskih motora za propulziju LNG brodova novijih generacija. Uređaji za ukapljivanje ugrađeni su i na brodove s parno-turbinskim postrojenjima kako se za izgaranje ne bi koristio teret koji je u vrijeme takvih projekata bio skuplji nego teško gorivo. Međutim, cijena teškog goriva je više-struko porasla te su svi slični projekti obustavljeni, a za dovršene se ne koristi uređaj za ukapljivanje. Kod takvih se brodova LNG teret prisilno isparava kako bi se teško gorivo trošilo u što manjoj mjeri.

S obzirom na trenutnu cijenu teškog goriva potpuno je neisplativo koristiti ga kako za pogon broda tako i za proizvodnju električne energije, naročito ako brod ima mogućnost izgaranja prirodnog plina. Treba naglasiti i relativno veliku snagu potrebnu za pogon uređaja za ukapljivanje, što je dodatni trošak koji u ovome radu nije uzet u razmatranje. Za primjer broda naveden u ovome radu snaga za pogon uređaja za ukapljivanje iznosi oko 920 W/kg isparenog plina, što za navedeni primjer iznosi oko 3.200 kW. Po sadašnjoj cijeni goriva te iskoristivosti generatora od 40-ak %, to je dodatnih 400 US\$ po satu rada (uz specifičnu potrošnju goriva od 180 g/kWh).

LNG brodovi prevoze teret koji se današnjim tehnologijama može izgarati kako u generatorima pare tako i u dvotaktnim sporookretnim brodskim motorima. Uvjet da bi se na brod mogla ugraditi takva tehnologija je da brod ima mogućnost ukapljivanja ili izgaranja isparenog prirodnog plina u slučaju kvara, promjene opterećenja (usporavanja) ili zaustavljanja glavnog motora. Uređaj za ukapljivanje to omogućuje, a temeljem trenutnih cijena tekućih goriva koja se koriste za pogon LNG brodova opravdava se i ugradnja takvog postrojenja.

Današnje cijene tekućih goriva su takve da je isplativo koristiti prirodni plin kao gorivo na svim postrojenjima koja koriste tekuća fosilna

4. CONCLUSION

The natural gas ship reliquefaction plant is one of the most important technologies that have enabled the use of slow-speed marine diesel engines for the propulsion of the new generation of LNG ships. A reliquefaction plant has been installed on board steam-turbine ships in order to prevent LNG combustion that was, at the time of these projects, more expensive than the HFO. However, the heavy fuel oil price has tremendously increased so all such projects were suspended, while ships which have been completed do not use RP. Such a ship consumes forced evaporated LNG to save the heavy fuel oil consumption.

According to the current heavy fuel oil price, it is fully unprofitable to use it as the propulsion fuel as well as fuel for the electricity generation, especially on board ships which have the ability to burn natural gas. It should be emphasized that the reliquefaction plant needs a relatively large power which is an additional cost and, in this paper, it has not been taken into consideration. For the ship example, listed in this paper, the requested power for the reliquefaction plant operation is about 920 Watts per kg of evaporated gas, which is about 3200 kW. According to the current heavy fuel oil price and generator efficiency of 40%, it is an additional US\$ 400 per hour (with a specific fuel oil consumption of 180 g/kWh).

LNG ships carry cargo that, with the today's technology, can burn in the steam generators as well as in slow-speed two-stroke marine diesel engines. The requirements, that those types of ships could incorporate such technology, are that the ships are able to reliquefy or burn the evaporated natural gas in case of failure, load changes (slowing down) or stopping the main engine. The reliquefaction plant allows such requests and, based on current liquid fuels prices, the use, for the LNG carriers operation, of the installation of such facilities is approved.

The today's liquid fuel prices are such that it is profitable to use natural gas as fuel in all installations that use liquid fossil fuels. This includes all ships and stationary facilities, as well as car, trucks, trains, etc. For installations with large fuel consumptions, a good choice would be a combined propulsion plant that can burn natural gas and heavy fuel oil thus providing a possibility of a rapid adaptation to changes on the fuel prices market. For large consumers, such as thermal electric power plants and large

goriva. Tu spadaju svi brodovi i stacionarna postrojenja, pa i automobili, kamioni, vlakovi i sl. Za postrojenja koja imaju veliku potrošnju goriva dobar izbor bi bilo kombinirano pogonsko postrojenje koje može izgarati prirodni plin i teško gorivo, kako bi se što brže prilagođavalo tržišnim promjenama cijena goriva. Za velike potrošače poput termoelektrana ili velikih dizelskih generatorskih stacionarnih sustava korištenje prirodnog plina po današnjim cijenama je više nego isplativo. S obzirom da je cijena goriva promjenjiva veličina, treba razvijati fleksibilne sustave s mogućnošću brzog prilagođavanja tržištu.

Prednosti korištenja prirodnog plina umjesto teškog goriva ili mazuta, a s obzirom na ekološke kriterije, su neupitne. Prirodni plin je ekološki prihvatljivo gorivo bez štetnih sumpornih spojeva, uz vrlo malo čađe i krutih čestica, čega u teškim gorivima ima mnogo. Ove prednosti te značajna ušteda u cijeni goriva stavljaju prirodni plin na prvo mjesto, a uređaj za ukapljivanje omogućuje njegovu primjenu na brodovima.

stationary diesel-generator electric power plants, the use of natural gas at current prices is more than profitable. Given the volatile fuel prices, a flexible system should be developed with rapid market adjustment possibilities.

The advantages of using natural gas instead of heavy fuel oil or mazut, and considering the environmental criteria, are unquestionable. Natural gas is an environmentally friendly fuel with no harmful sulfur compounds, little soot and particulate matter, which are in huge quantities in heavy fuel oils. Those benefits and significant savings in fuel prices place natural gas as a first choice and reliquefaction plant allows its application on board a ship.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] www.hamworthy.com
- [2] Moon, J. W., et al., Cryogenic Refrigeration Cycle for Re-Liquefaction of LNG Boil-Off Gas
- [3] N. Radovniković; N., Postrojenje za preukapljivanje isparenog plina u LNG tankera tipa Q-flex, Ukoračak s vremenom, (2011), 43, str. 29 – 44
- [4] LNG Carrier Propulsion by ME-GI Engines and/or Reliquefaction. MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark (www.manbw.de/files/news/files/3856/P9027-04-04.pdf)
- [5] Anderson, Thomas N, et al., Shipboard Reliquefaction for Large LNG Carriers
- [6] MAN B&W: LNG Carrier Propulsion by ME Engines and Reliquefaction
- [7] Wärtsilä: Dual-Fuel LNGC, March, 2008.
- [8] <http://www.bunkerworld.com/prices/port/ae/fjr/>